

ESTUDIO SOBRE PROBLEMÁTICA DE ALTAS TEMPERATURAS EN LOS
COJINETES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA TEQUENDAMA

JULIÁN DAVID MARÍN HENAO

CODIGO: 1088318982

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

Bogotá, enero 2020

ESTUDIO SOBRE PROBLEMÁTICA DE ALTAS TEMPERATURAS EN LOS
COJINETES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA TEQUENDAMA

JULIÁN DAVID MARÍN HENAO

CODIGO: 1088318982

Trabajo de grado presentado para optar al título de ingeniero mecánico

Director

RAFAEL ALBERTO LOPEZ GUARNIZO

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

Bogotá, enero 2020

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	5
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	6
2. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES	7
3. OBJETIVOS.....	8
4. ENEL – EMGESA.....	9
5.1 LA EMPRESA:.....	9
5.2 UBICACIÓN DE LA EMPRESA.....	9
5.3 PLANO DE LOCALIZACIÓN DE LA CENTRAL	10
5.4 MISIÓN Y VISIÓN	10
5.4.1 Misión.....	10
5.4.2 Visión	11
5. METODOLOGÍA.....	12
6. COJINETES.....	13
7. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	14
8. ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA	18
8.1 INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA	18
8.2 TOMA DE DATOS.....	19
8.3 ANÁLISIS E INGENIERÍA DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	21
8.3.1 Descarga de la bomba.....	21
8.3.2 Entrada de caudal a cada unidad.....	24
8.3.3 Entrada de caudal a celdas de refrigeración	25
8.3.4 Temperaturas y espesores.....	26
8.3.5 Calor disipado en cada unidad de generación	29
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	31

BIBLIOGRAFÍA	33
ANEXOS	34

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Localización Central hidroeléctrica Tequendama	10
Ilustración 2: Ejemplo cojinete segmentado	13
Ilustración 3: Bombas de refrigeración	15
Ilustración 4: Disposición celdas de refrigeración.....	15
Ilustración 5: Esquema planta de suavización.....	16
Ilustración 6: Isométrico de sistema refrigeración	17
Ilustración 7: Disposición transductores una travesa	19
Ilustración 8: Requerimiento para fluido laminar	20
Ilustración 9: Esquema de toma de datos	21
Ilustración 10: Ficha técnica bomba del sistema	23
Ilustración 11: Compilación de resultados de tomas de caudal.....	24
Ilustración 12: Punto de tomas espesores y temperaturas.....	29
 Tabla 1: Resumen de medición de espesores y temperaturas.....	 29
Tabla 2: Calor disipado por cada unidad.....	30
 Gráfica 1: Medición de caudal descarga de la bomba.....	 22
Gráfica 2: Medición de caudal entrada celdas de refrigeración.....	25

INTRODUCCIÓN

La central hidroeléctrica Tequendama pertenece a ENEL- EMGESA tiene una capacidad instalada de 56.8 MW que se obtienen gracias a cuatro (4) unidades de generación, estas unidades proveen energía eléctrica gracias al Salto de Tequendama que es una cascada natural de Colombia, ubicada en el municipio de Soacha en el Departamento de Cundinamarca. Está ubicada a aproximadamente 30 km al suroeste de Bogotá.

Con el paso de los años de operación de la central hidroeléctrica se ha presentado un problema de altas temperaturas en los cojinetes de cada turbo generador, este problema ha ido evolucionando a tal punto de generar paradas de las unidades por sobre temperatura en los cojinetes.

Como medida correctiva a este problema se cambió las bombas de refrigeración por otras de una mayor capacidad, sin embargo, el problema persiste hasta hoy en día.

Se han generado varias hipótesis que buscan identificar la raíz del problema, entre ellas: que el caudal de entrada de las unidades más alejadas de la descarga de la bomba sea menor debido a problemas de diseño del sistema de refrigeración, incrustaciones en la tubería, problema de eficiencia de las celdas, radiadores en mal estado, entre otros problemas. Se han realizado diferentes propuestas para finiquitar esta problemática, estas propuestas van desde independizar el sistema de refrigeración (instalar más bombas de refrigeración e independizar las unidades de generación) hasta remover las incrustaciones de la tubería con ataques químicos. Dado los antecedentes de temperaturas de la central hidroeléctrica se ha podido evidenciar que a lo largo de los años las temperaturas promedio han incrementado de manera considerable, a tal punto de provocar paradas en la unidad.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el siguiente trabajo de grado se realizará un análisis para encontrar la causa raíz de las altas temperaturas que actualmente se están presentando en cada una de las unidades la central hidroeléctrica Tequendama; la central Tequendama es una hidroeléctrica de filo de agua que cuenta con cuatro (4) unidades verticales de generación hidráulica con turbina tipo Pelton que alcanza una potencia 14,2 MW cada una.

Es importante resaltar que desde la construcción de la central no se ha realizado ningún procedimiento de desincrustación (remover el recubrimiento formado por los minerales que se han adherido a las paredes de las tuberías), adicional a la falta de mantenimiento de la tubería del sistema de refrigeración, la planta de suavización cuyo objetivo es reducir el problema de incrustación no se encuentra operativa.

Este análisis se realizó en base a un conjunto de datos cuantitativos como caudal, temperaturas, espesores de tuberías, entre otros datos obtenidos del sistema de refrigeración, que permitan por medio de un análisis de ingeniería encontrar las causas raíz del problema de alta temperatura y posteriormente proponer distintas soluciones que permitan solventar esta problemática. Adicional a estas medidas se realizará un análisis del histórico de temperaturas de años anteriores para llevar a cabo un mejor seguimiento y trazabilidad de la problemática.

2. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES

En este trabajo de grado se pretende identificar de una manera clara y referenciada la causa raíz del problema de temperatura de los cojinetes de turbina de cada unidad de generación de la central hidroeléctrica Tequendama.

Las unidades de generación de la central hidroeléctrica cuentan con un sistema de protección cuya función principal es proteger como su nombre lo indica los componentes involucrados en el proceso de “generación” energética, así como evitar accidentes que atenten contra la integridad física de las personas. El sistema de protección por altas temperatura en los cojinetes ha sido el indicativo más claro y evidente de la problemática actual; se han presentado reiteradamente paradas por altas temperaturas en los cojinetes, esto tiene serias repercusiones no solo en el aspecto económico sino también en el aspecto operativo de la central.

Es importante resaltar que cuando la unidad se dispara no se puede reanudar la operación de inmediato, se debe identificar el problema, solucionarlo y arrancar la unidad nuevamente; cada hora de no-operación de la unidad tiene un costo aproximado (trabajando la unidad a su máxima capacidad) de \$3.243.280 COP.

Nota: para la valoración del impacto económico se tomó como referencia el precio de bolsa del promedio nacional del año 2019 el cual fue de 228,4 \$/kW/h.

Según el histórico de temperaturas, el cojinete que presenta mayores temperaturas es el cojinete de empuje, alcanzando hasta más de 89°C.

Las cuatro (4) unidades de generación generan alerta por alta temperatura a los 90°C y finalmente se dispara cuando la temperatura del metal del cojinete de empuje llega a los 95°C.

3. OBJETIVOS

Objetivo general

- Realizar un estudio especificando las causas reales del incremento de temperatura en los cojinetes de la central hidroeléctrica y posibles soluciones.

Objetivos específicos

- Recolectar información de los equipos implicados en el sistema de refrigeración de la central hidroeléctrica (fichas técnicas, características, planos, estados de equipo).
- Comprobar la validez y que la información realmente pertenezca a estos equipos.
- Realizar mediciones de caudales, temperaturas, espesores, propiedades del fluido, materiales y condición de los equipos.
- Realizar los cálculos necesarios para identificar la problemática actual.

4. ENEL – EMGESA

5.1 La empresa:

Razón social:

Enel – Emgesa S.A.

Sector:

Energético.

Actividad económica:

Generación energética.

5.2 Ubicación de la empresa

Dirección: Cr 13ª # 93-66 - 2º piso.

Municipio: Bogotá DC.

Departamento: Cundinamarca.

País: Colombia.

5.3 Plano de localización de la central

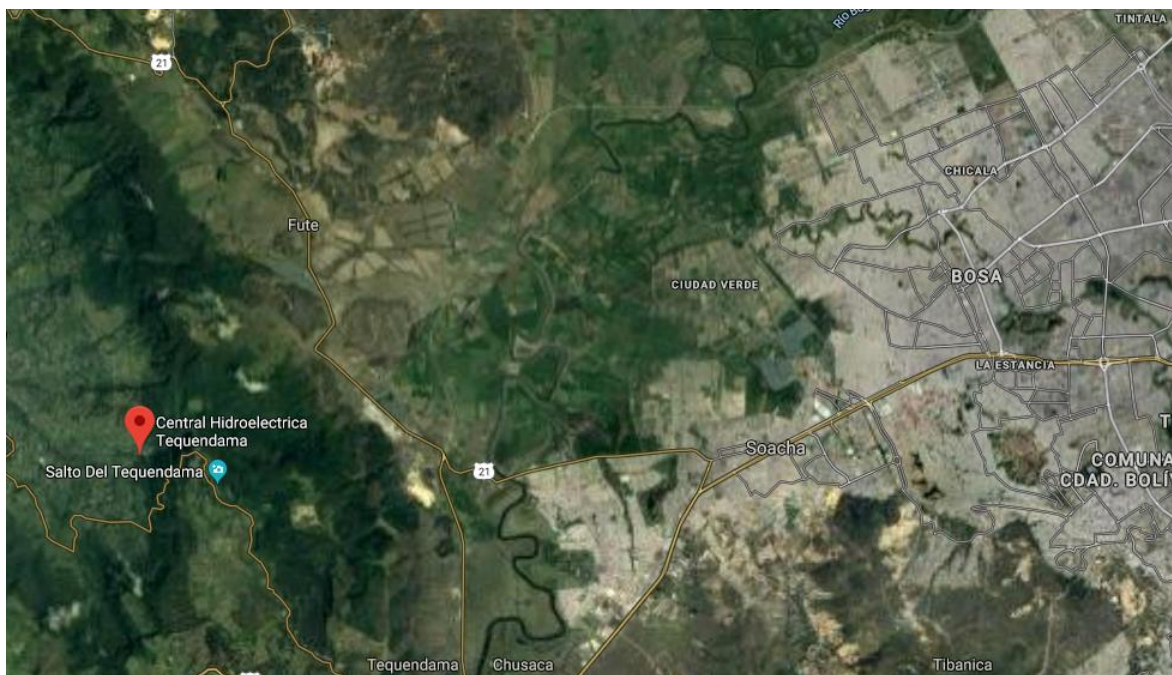


Ilustración 1: Localización Central hidroeléctrica Tequendama

5.4 Misión y visión

5.4.1 Misión

Se trata de proyectos ambiciosos en los que trabajamos con el entusiasmo de quien desea cambiar el mundo. En concreto, nuestra misión es la siguiente:

- Abrir el acceso a la energía a un mayor número de personas

Ampliamos nuestras dimensiones para alcanzar y conectar un mayor número de personas a una energía segura y sostenible, especialmente en Sudamérica y África.

- Abrir el mundo de la energía a nuevas tecnologías

Dirigimos el desarrollo y la aplicación de nuevas tecnologías para

generar y distribuir la energía de forma más sostenible, sobre todo a través de fuentes renovables y de redes inteligentes.

- Abrirnos a nuevos métodos de gestionar la energía para las personas

Desarrollamos nuevos métodos que se ajustan a las necesidades efectivas de las personas, para ayudarlas a utilizar y gestionar la energía de manera más eficiente, sobre todo recurriendo a los contadores inteligentes y a la digitalización.

- Abrirnos a la posibilidad de nuevos usos de la energía

Desarrollamos nuevos servicios que emplean la energía para hacer frente a desafíos de carácter mundial dedicando una atención especial a la conectividad y a la movilidad eléctrica.

- Abrirnos a nuevas alianzas

Nos unimos a una red de colaboradores en la investigación, en la tecnología y en el diseño de nuevos productos, así como en el marketing, para desarrollar nuevas soluciones de forma conjunta.

5.4.2 Visión

Durante más de 50 años Enel ha traído progreso a la gente de todo el mundo. Desde el día en que Enel fue fundada, en 1962, hemos trabajado duro para ayudar a personas, empresas y naciones a prosperar mediante la conexión a la electricidad, el gas y los servicios adecuados para sus necesidades.

Por lo tanto, constantemente hemos adoptado nuevas tecnologías para volver más confiable, más asequible y sostenible nuestra energía - desde la introducción del primer contador inteligente hasta convertirnos en el mayor productor mundial de energía renovable.

Ahora estamos comenzando una nueva, emocionante, era para la energía; una era abierta de participación, donde todo el mundo está conectado y tiene la oportunidad de participar y hacer frente a los grandes desafíos del mundo.

5. METODOLOGÍA

Para identificar la raíz de la problemática actual ya mencionada anteriormente, se desarrolló un plan de acción a fin de abordar el proyecto de la mejor manera. Dentro de la metodología aplicada se definió la necesidad de medir un conjunto de datos cuantitativos para evidenciar el estado de operación actual del sistema de refrigeración.

Estos datos cuantitativos se implementaron en un conjunto de formulaciones matemáticas, entre ellas primera ley de la termodinámica, ley de Fourier para transferencia de calor, ley de enfriamiento de Newton, ecuación de Darcy-Weisbach para cálculo de pérdidas en tuberías.

Adicional a los datos cuantitativos mencionados, se implementaron conceptos teóricos como balances de energía, conservación, de la masa entre otros. Conceptos necesarios para poder identificar la raíz del problema planteado de una manera correcta y bien argumentada.

Se construyeron tablas e imágenes esquemáticas para dar un mejor entendimiento a los lectores de este trabajo y una mejor representación de los datos obtenidos por los equipos de medición.

6. COJINETES

Los cojinetes son piezas usualmente metálicas diseñadas para soportar las cargas generadas por el giro del arbol de la unidad de generación, lo cojinetes de la central hidroeléctrica Tequendama cuentan con un recubrimiento antifricción llamado Babbitt.



Ilustración 2: Ejemplo cojinete segmentado

La función principal de este recubrimiento es reducir la fricción que se genera por el movimiento relativo entre el arbol del generador y el cojinete.

Cada cojinete se ubica en una cuba que se rellena con lubricante el cual su función principal es generar una película hidrodinámica entre el arbol y el recubrimiento, reduciendo de esta manera el contacto directo entre ambas superficies y en consecuencia “transferir” la temperatura generada al lubricante.

Todas las unidades de generación de la central Tequendama cuentan con cojinete de empuje, cojinete superior, cojinete inferior y cojinete de turbina, según el histórico del anexo A de temperaturas de los cojinetes se ha observado que el cojinete de empuje es el que más tiene problemas por altas temperaturas ya que en ocasiones ha alcanzado más de 89°C según el histórico.

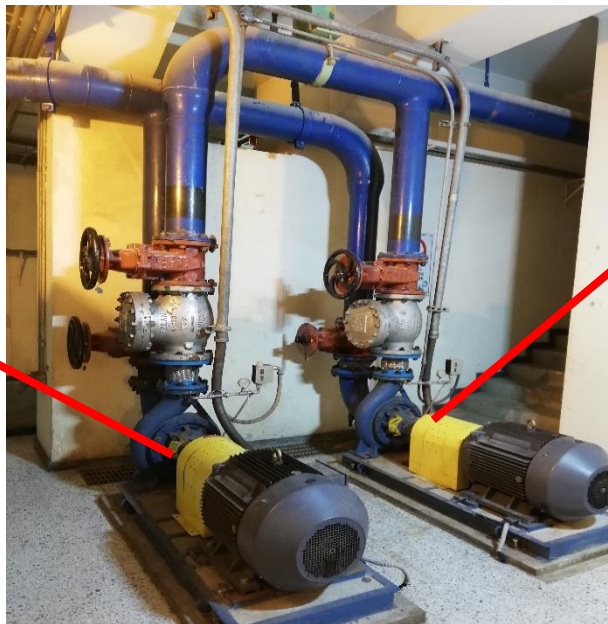
7. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

El sistema de refrigeración de una central hidroeléctrica es fundamental para el óptimo funcionamiento de cada turbogruppo o unidad de generación, ya que es el encargado de disipar el calor generado por la fricción entre el árbol del generador y los cojinetes guía.

la central hidroeléctrica Tequendama consta de 4 unidades de generación, cada unidad de generación se encuentra refrigerada por el mismo sistema de refrigeración, es decir, el sistema de refrigeración consta de dos bombas, una de respaldo (que se activa en caso de que fallo de la principal) y una bomba principal, esta última se encarga de distribuir toda el agua proveniente de la torre de refrigeración a través de un conjunto de tuberías a cada una de las unidades de generación significando esto que es un sistema dependiente de una sola bomba.

Ambas bombas tienen las mismas características técnicas de cabeza, caudal, velocidad de giro, potencia y diámetro del impeller.

Bomba de refrigeración principal



Bomba de refrigeración de respaldo

Ilustración 3: Bombas de refrigeración

Nota: cuando se realizaron las mediciones de caudal la bomba que se encontraba en operación era la bomba de respaldo.

El sistema de refrigeración cuenta con 6 celdas de enfriamiento de tiro inducido instaladas en paralelo.

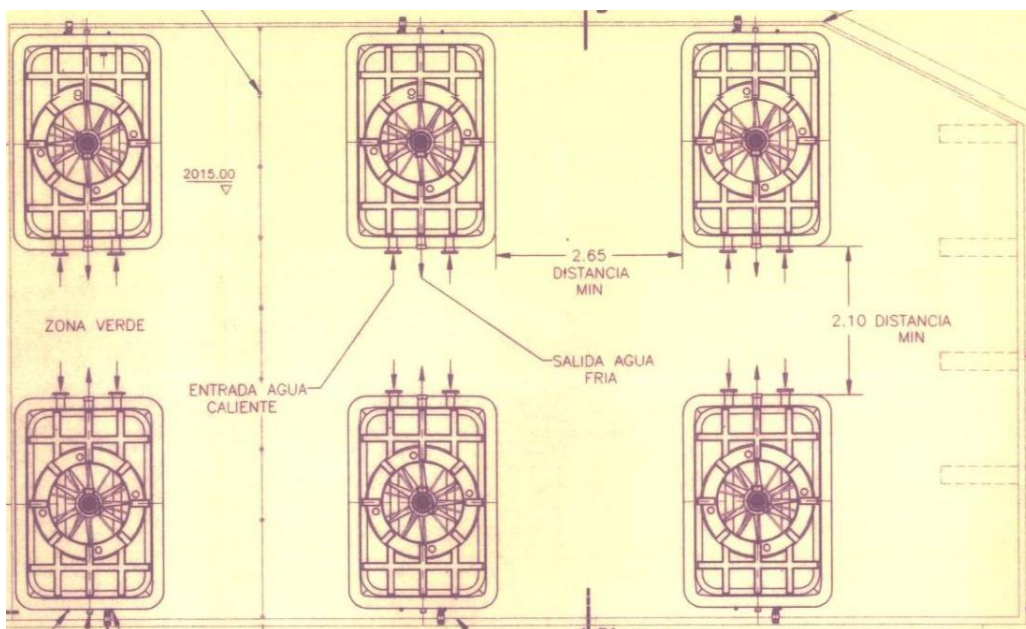


Ilustración 4: Disposición celdas de refrigeración

Aunque el sistema de refrigeración es cerrado cuenta con una entrada de agua de reposición para reponer las pérdidas por evaporación del agua en las celdas de refrigeración.

El agua de reposición que entra al sistema de refrigeración trae minerales que con el paso de los años han ido incrustando en las paredes de la tubería incrementando su espesor, esto se concluye en base a que se ha medido el espesor de la tubería y se ha evidenciado un incremento en comparación al diámetro de diseño como se mostrará en el numeral 8.3.4.

Dado a que el problema de incrustaciones es común en este tipo de sistemas, esto en base a que muchas de las centrales de generación de Enel-Emgesa han presentado síntomas similares; se instaló una planta de suavización en la central Tequendama cuyo objetivo es reducir la cantidad de minerales que trae el agua y reducir la incrustación. Sin embargo, esta planta de suavización no se encuentra operativa.

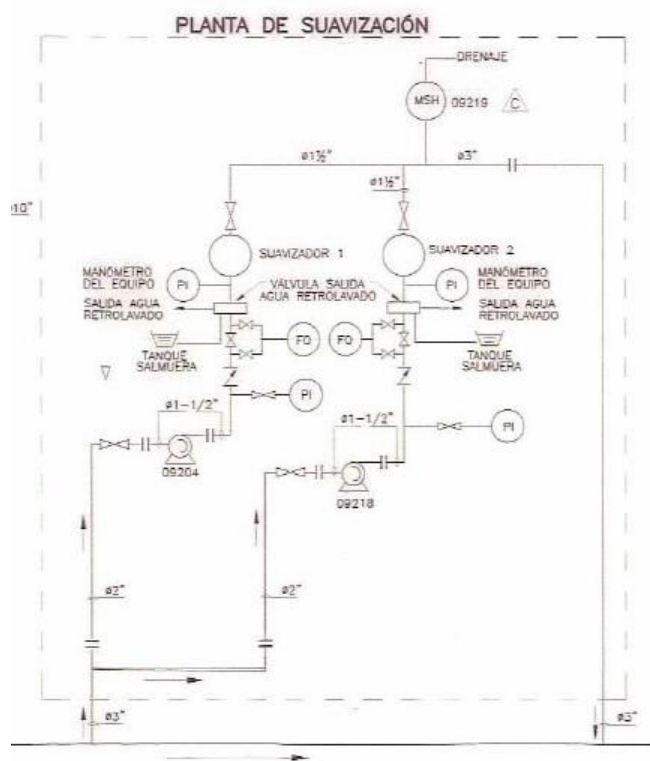


Ilustración 5: Esquema planta de suavización

La ausencia de esta planta de suavización ha influido negativamente en la condición física de las tuberías del sistema de refrigeración como se mostrará en el numeral 8.3.4.

A continuación, en la ilustración 6 se muestra la disposición de las unidades; la unidad uno (1) es la que se encuentra más alejada de la descarga de la bomba, mientras que la unidad cuatro (4) se encuentra más cerca la descarga.

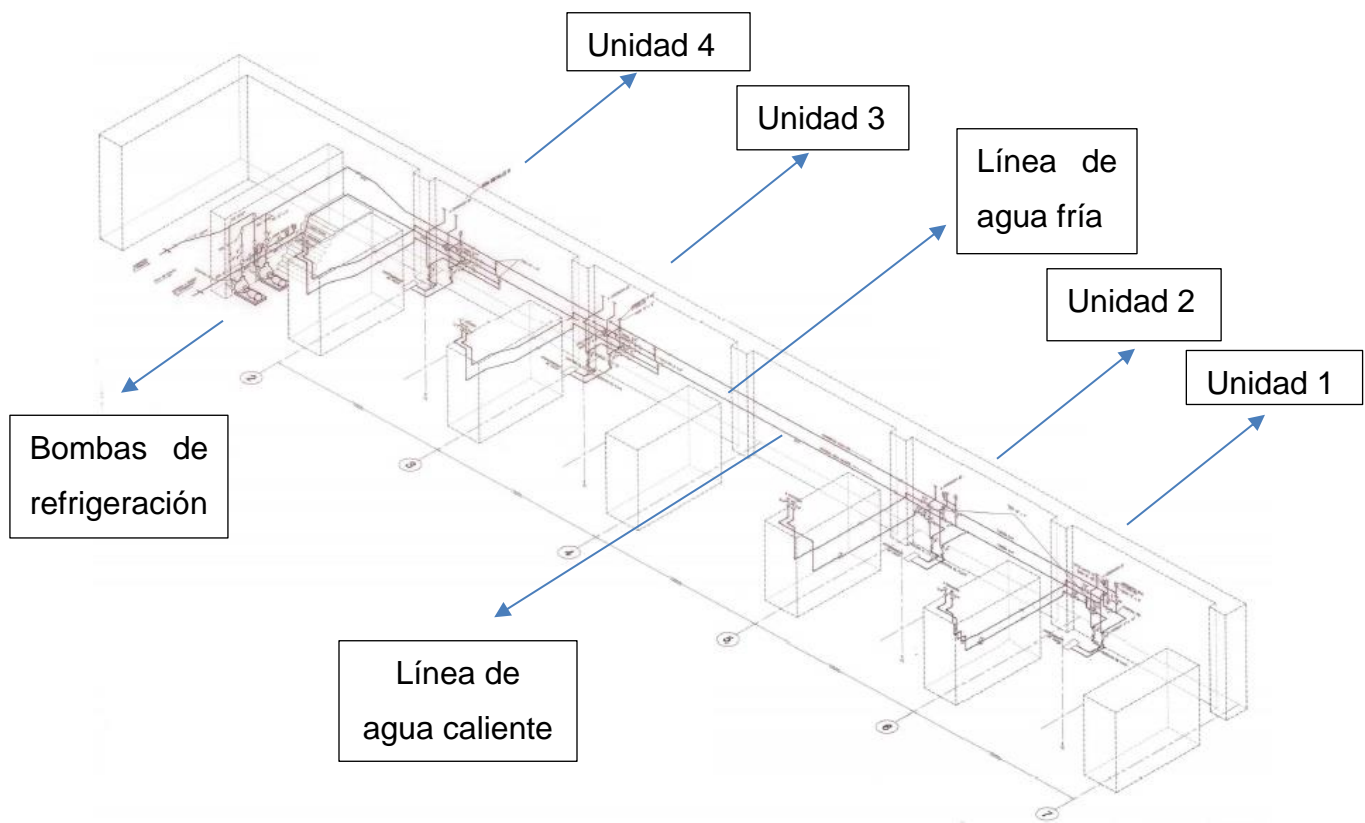


Ilustración 6: Isométrico de sistema refrigeración

8. ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA

Para identificar la raíz del problema de altas temperaturas que se está presentando actualmente es necesario un conjunto de datos cuantitativos para posteriormente realizar el análisis de ingeniería requerido para identificar las falencias del sistema de refrigeración.

8.1 Instrumentación utilizada

Para proceder con el estudio de la problemática se realizaron diferentes mediciones:

- Caudal.
- Temperatura superficial de la tubería.
- Espesor de tubería en cada punto de medición.

Estas medidas se realizaron con la siguiente instrumentación:

- Caudal → General Electric Panametric Ultrasonic PT 900 el cual posee una precisión de $\pm 1\%$ de la lectura para tuberías de 2 pulg./50 mm o superior.
- Temperatura → Positector DPM el cual posee una precisión de $\pm 0.5^\circ \text{C}$.
- Espesor de la tubería → Dakota MVX Ultrasonic $\pm 0.5 \%$ (para acero 1020)

8.2 Toma de datos

Se realizó la de toma de datos de los siguientes elementos:

- Descarga de la bomba.
- Entrada a celdas de refrigeración.
- Salida y entrada de cada unidad de generación.
- Temperatura de cada punto de toma de caudal.
- Espesor de cada punto de toma de caudal.

Nota: Es importante aclarar que para la medición de caudal se realizó con la siguiente disposición de los transductores.

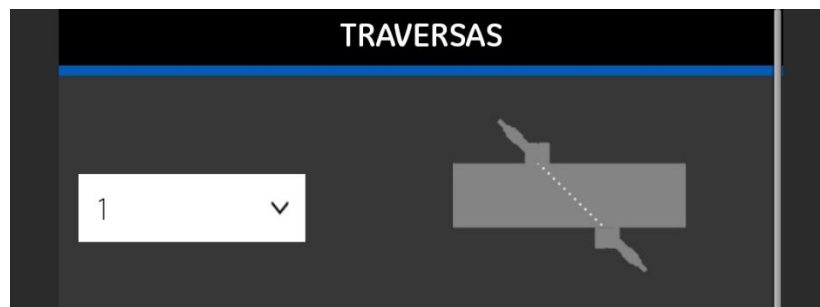


Ilustración 7: Disposición transductores una travesa

Entre mayor número de travesas se obtiene una mejor medida, sin embargo, esto se aplica a tuberías cuyo espesor no se encuentre afectado por incrustaciones u otros elementos que pueda variar el espesor de la tubería en el punto de la medición. Ya que entre más travesas la onda sónica rebota un mayor número de veces por

tal motivo es necesario que el diámetro interno sea homogéneo, cosa que no sucede en este caso, ya que el espesor de la tubería varía debido a incrustaciones provenientes del agua de reposición del sistema la cual posee una alta dureza.

Para obtener una mayor precisión y confiabilidad de la medida del caudal, el instrumento de medición (PT 900) requiere que el comportamiento del fluido que circula por la tubería sea del tipo laminar, para garantizar esta condición es necesario asegurar que la longitud aguas arriba (desde el transductor) sea de diez (10) veces el diámetro de la tubería y cinco (5) veces el diámetro aguas abajo como se muestra en la ilustración 8, a lo largo de la longitud no debe haber accesorios que impidan que el fluido se desarrolle correctamente.

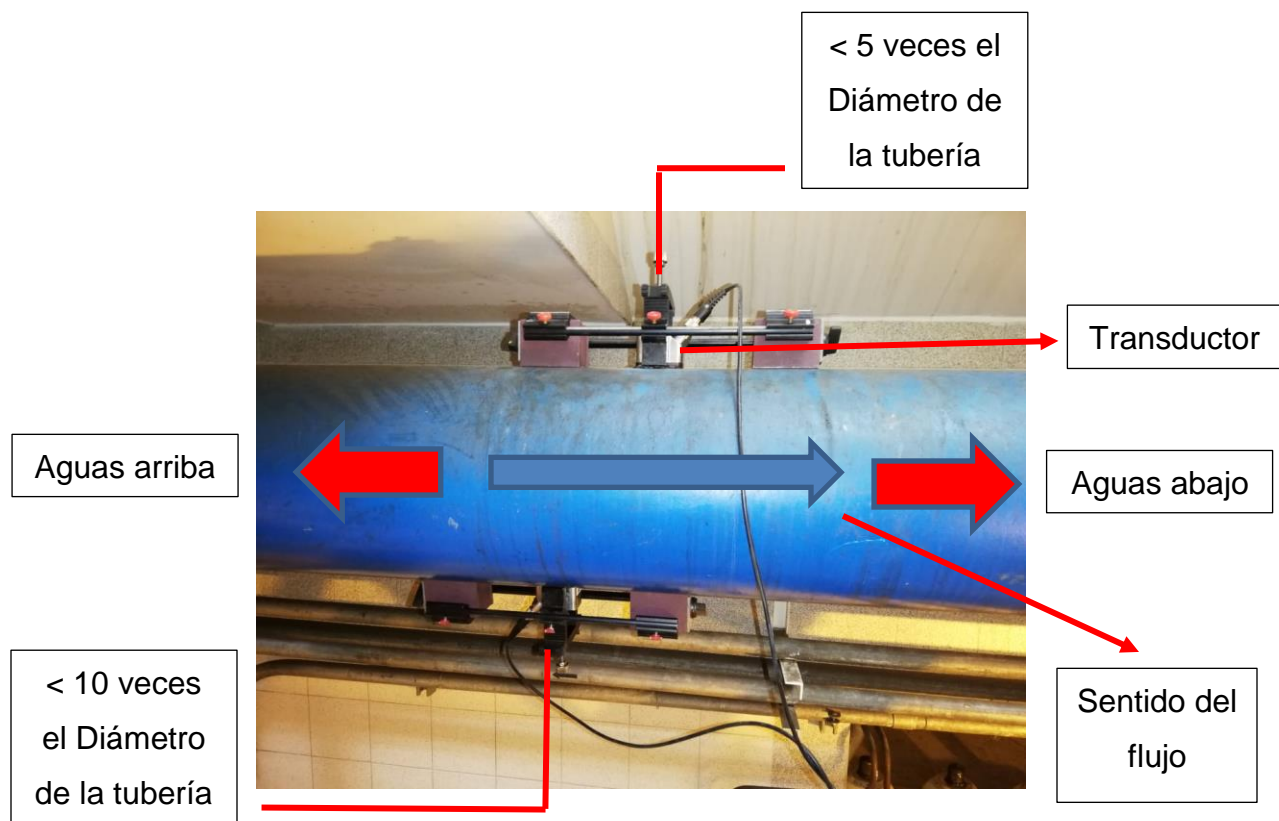


Ilustración 8: Requerimiento para fluido laminar

Nota: para que la medida de caudal sea lo mas confiable posible se aseguró esta condición longitudinal en todas las tomas de caudal.

Adicional a la longitud necesaria para que el flujo se desarrolle completamente, el caudalímetro requiere de otros parámetros adicionales como espesor y temperatura.

8.3 Análisis e ingeniería de los datos obtenidos

En la ilustración 9 se muestra esquemáticamente la posición en la cual se realizaron las tomas de caudal, en los mismos puntos y de manera similar se midió temperaturas y espesores.

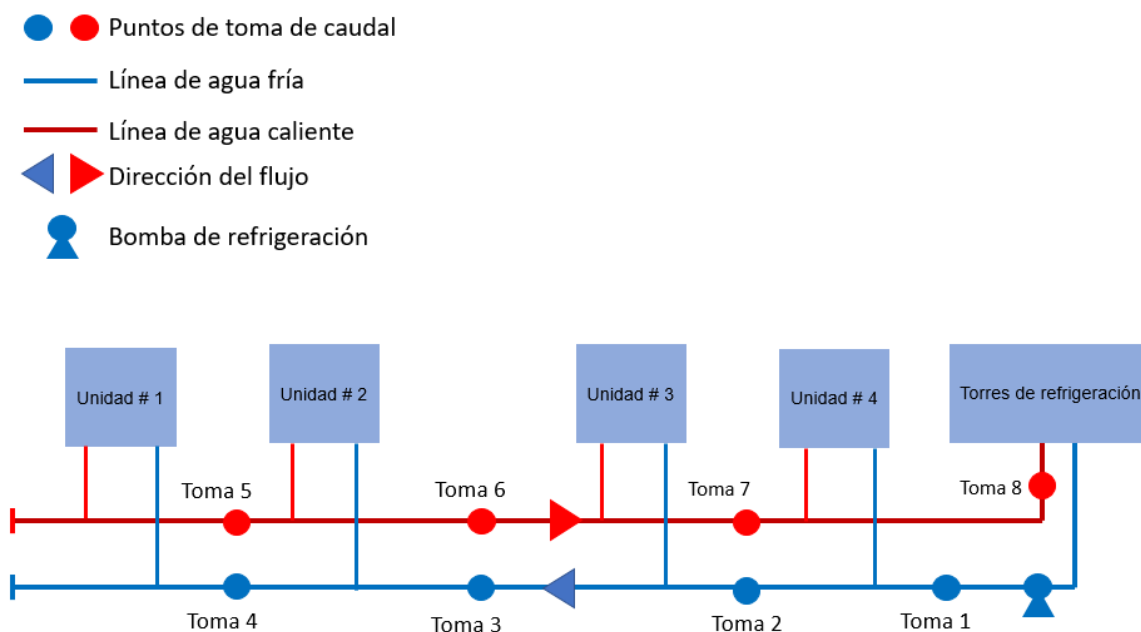


Ilustración 9: Esquema de toma de datos

8.3.1 Descarga de la bomba

Se realizó la toma de caudal a la descarga de la bomba, algunas mediciones se encontraban por fuera del límite superior y el límite inferior; estos límites son las

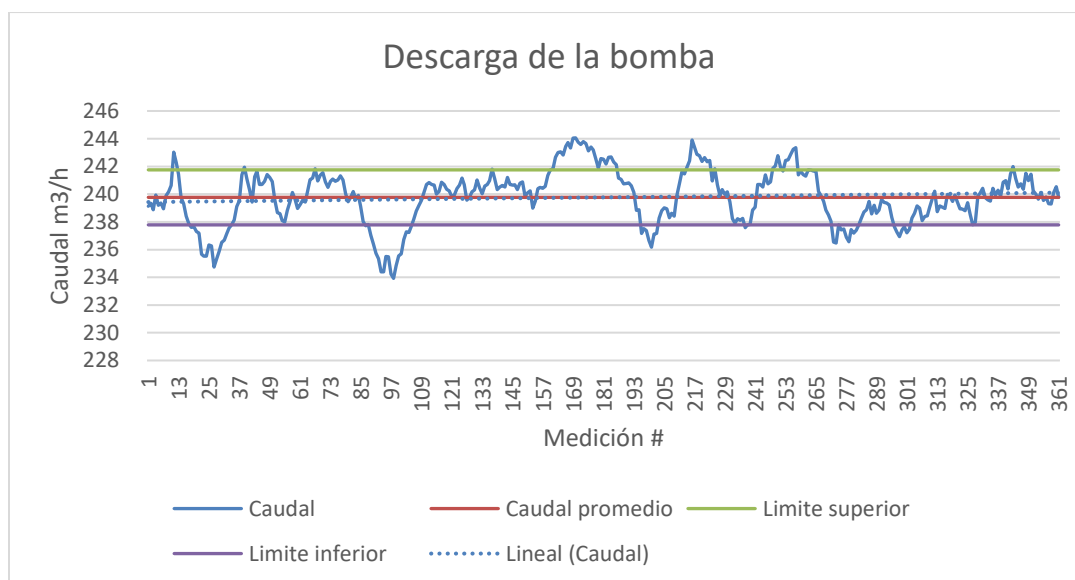
convergencias de las sucesiones en cuestión.

Estos límites se hallaron de la siguiente manera:

$$\text{Limite superior} = \text{promedio}_{\text{ponderado}} + \text{Desviación estandar}$$

$$\text{Limite inferior} = \text{promedio}_{\text{ponderado}} - \text{Desviación estandar}$$

Dado que cada una de las medidas tienen el mismo valor representativo, es decir todas tienen la misma importancia, el promedio ponderado en este caso es igual al promedio aritmético la desviación estándar fue de $\pm 1,98 \text{ m}^3/\text{h}$.



Gráfica 1: Medición de caudal descarga de la bomba

La bomba está diseñada para trabajar a un caudal de $360 \text{ m}^3/\text{h}$ y actualmente está bombeando $239.89 \text{ m}^3/\text{h}$, esto significa que la bomba está operando muy por debajo de su capacidad de diseño.



Ilustración 10: Ficha técnica bomba del sistema

Se le atribuye parte de la disminución del caudal de operación de la bomba a las pérdidas ocasionadas por la alta rugosidad de la tubería, debido a las incrustaciones.

La ecuación Fanning de pérdidas en una conducción en términos de altura de altura es:

$$h_f = \frac{4 * f * L}{d} * \frac{V^2}{2g}$$

Al reducir el área interna de la tubería debido a las incrustaciones se incrementa la velocidad del fluido, esto provoca un incremento en las pérdidas, dado que el comportamiento de las pérdidas son función exponencial de la velocidad, esto tiene un impacto directo en el caudal que

puede entregar la bomba.

Adicional a esto existe más factores que influyen en la cantidad de caudal que circula por la tubería, como los cambios de sección, accesorios, entre otros...

8.3.2 Entrada de caudal a cada unidad

A continuación, en la ilustración 11 se muestra en una imagen esquemática el resumen de resultados para los caudales de entrada y salida de cada unidad de generación.

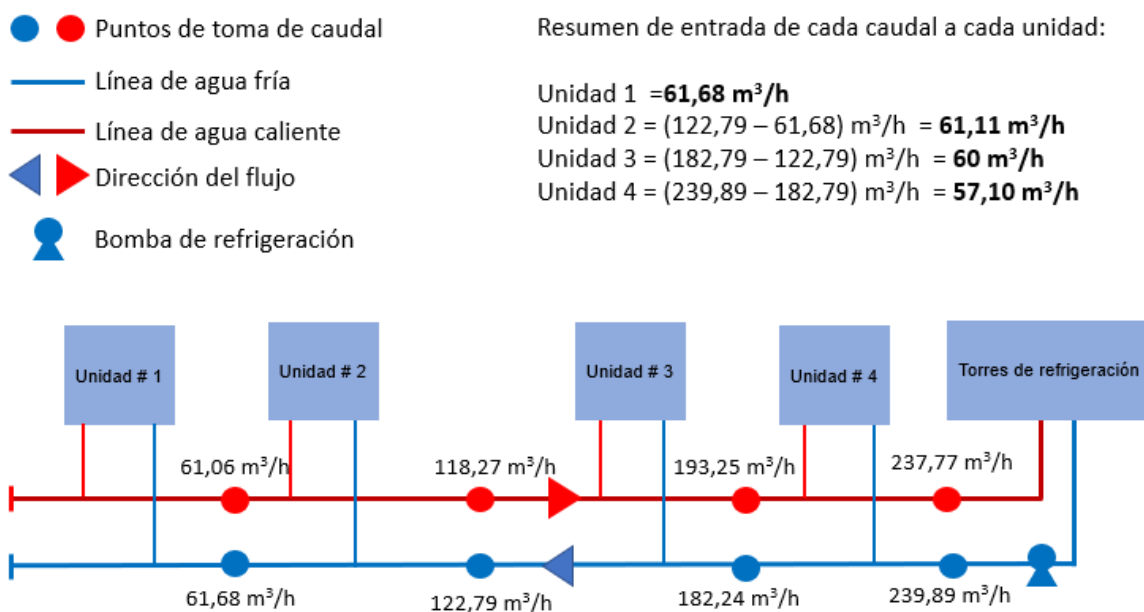


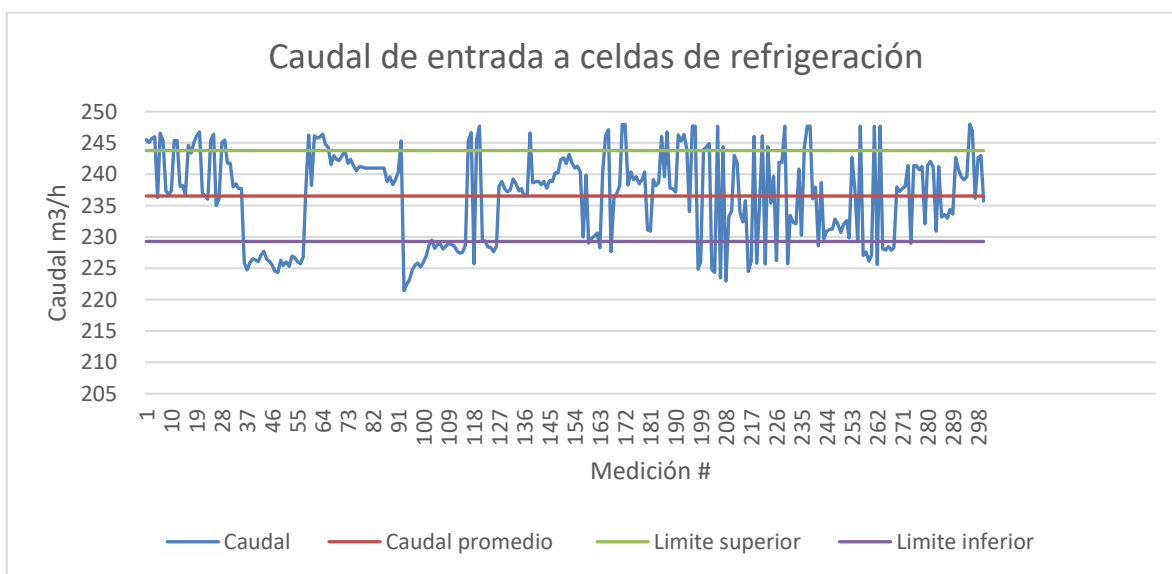
Ilustración 11: Compilación de resultados de tomas de caudal

Se puede observar que los caudales de entrada a cada unidad de generación son similares, significando esto que a cada unidad entra aproximadamente el mismo caudal.

En base a esto se descarta que a la unidad 1 que se encuentra más alejada de la descarga de la bomba le llega menos caudal.

8.3.3 Entrada de caudal a celdas de refrigeración

Se confirma en base a las mediciones realizadas que el sistema no presenta pérdidas de caudal significativas ya que el caudal neto que ingresa a las celdas de refrigeración es aproximadamente igual al caudal medido en la descarga de la bomba; se realizó el mismo procedimiento del numeral 8.3.1 (límite superior, inferior, desviación estándar) y se obtuvo que el valor del caudal fue de **237,77 m³/h** donde la desviación estándar fue de $\pm 7,25$ m³/h.



Gráfica 2: Medición de caudal entrada celdas de refrigeración

Es importante aclarar que se pueden presentar pequeñas variaciones entre el caudal de descarga y entrada a las celdas debido a la precisión del instrumento la cual es de $\pm 1\%$, condición de la tubería, entre otros...

Las celdas de refrigeración están diseñadas para una capacidad máxima de 83.124 m³/h, las seis (6) celdas de refrigeración operan de manera simultánea, esto significa que teóricamente las celdas de refrigeración están sobredimensionadas, sin embargo, históricos en la central indica que cuando operan menos de 6 celdas las temperaturas se incrementan.

Una forma de evidenciar esto es aplicar ecuación de calor.

Se sabe que:

$$Q = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

Donde se sabe que el flujo másico depende directamente del área, como se mencionó anteriormente esta reducción del área incrementa la velocidad del fluido por ende sus pérdidas también incrementan y como consecuencia una reducción del caudal, se sabe que al reducir el caudal el delta de temperaturas debe ser mayor, sin embargo, este no es el caso ya que como se mostrará en el numeral 8.3.4 el cambio de temperatura es de 2.23°C, dadas las condiciones de diseño para el caudal máximo de 83.124 m³/h el delta de temperatura debe ser de 3°C.

8.3.4 Temperaturas y espesores

Como se mencionó anteriormente el caudalímetro necesita dos (2) parámetros adicionales para la correcta medición de caudal, la temperatura del fluido y el espesor de la tubería por donde circula el agua.

La razón de la importancia de estos parámetros es que el caudal es directamente proporcional al área de la tubería y a la velocidad del fluido; al variar el espesor, el área también cambia y como consecuencia el caudal. El caudalímetro envía ondas que viajan a través de la tubería a la velocidad del sonido, dependiendo de la temperatura del fluido la velocidad de sonido en el agua cambia, este cambio de la velocidad del sonido en el medio provoca cambios en la medición de la velocidad del fluido.

El espesor de la tubería no es constante debido a las incrustaciones, por ende, fue necesario realizar mediciones del espesor en los puntos donde se ubicaron los transductores, son dos (2) transductores por lo tanto fue necesario medir el espesor en ambos puntos y calcular un promedio.

Las medidas de temperaturas realizadas son mediciones superficiales, es decir es la temperatura en la superficie de la tubería y no la temperatura del fluido, por esta razón fue necesario aplicar ley de Fourier para transferencia de calor por conducción y ley de enfriamiento de Newton para transferencia de calor por convección. Dado que la variación de temperatura del agua por convección es despreciable no se incluirá en este análisis, sin embargo, se incluirá la convección del aire y la transferencia de calor por conducción en la tubería.

Ley de Fourier para transferencia de calor en una pared cilíndrica:

$$q = k \cdot \frac{2\pi L(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Ley de enfriamiento de Newton

$$q = h \cdot 2\pi \cdot r^2 \cdot (T_2 - T_{amb})$$

$$k \cdot \frac{2\pi L(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = h \cdot 2\pi \cdot r^2 \cdot (T_2 - T_{amb})$$

Donde:

K_{acero} : Conductividad térmica del acero al carbono 47 W/m° K

h_{aire} : Coeficiente de transferencia de calor 20 w/m² K

r_1 : Es el radio interno (128,11 mm) para la toma 1 espesor 8,39 mm

r_2 : Es el radio externo (136,5 mm)

T_2 : Temperatura superficie (21°C) para la toma 1

T_1 : Temperatura aproximada fluido (incógnita)

T_{amb} : Temperatura medio ambiente (19°C)

La tubería es de 10", sch 30 y posee 273 mm de diámetro externo.

Al remplazar los datos y despejar la temperatura T_1 se obtiene que para la toma 1 correspondiente a la descarga de la bomba la temperatura del fluido es **21,25°C**.

De manera similar se midió la temperatura del fluido en cada toma para observar las variaciones y la transferencia de calor dentro de cada generador.

A continuación, en la tabla 1 se muestra el resumen de las tomas de espesores y temperaturas.

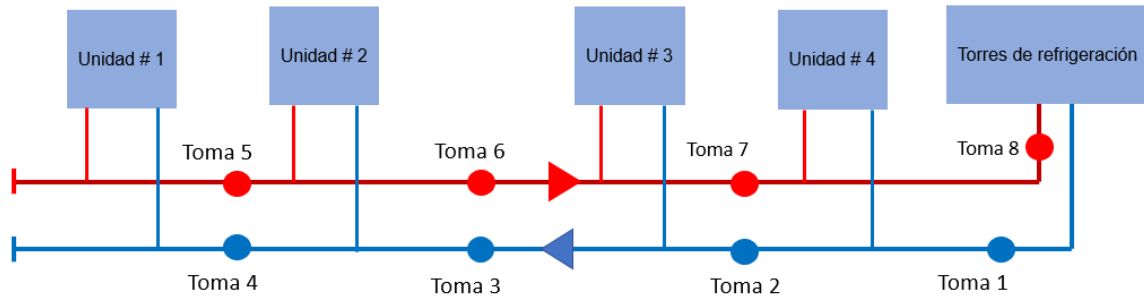


Ilustración 12: Punto de tomas espesores y temperaturas

Tabla 1: Resumen de medición de espesores y temperaturas

	Espesor tubería transductor 1 [mm]	Espesor tubería transductor 2 [mm]	Promedio [mm]	Temperatura superficial °C	Temperatura real del fluido °C
Toma 1	8,48	8,3	8,39	21	21,25
Toma 2	9,24	9,23	9,235	21,3	21,57
Toma 3	9,33	9,33	9,33	21,8	22,07
Toma 4	9,2	9,6	9,4	21,9	22,17
Toma 5	9,57	9,71	9,64	23,7	23,97
Toma 6	9,71	8,89	9,3	23,9	24,17
Toma 7	8,96	8,94	8,95	23,6	23,87
Toma 8	8,91	8,91	8,91	22,6	23,48

Se observó un incremento en el espesor de tubería para algunos puntos de hasta 21%, esta reducción del diámetro interno reduce el área de transferencia de calor además de incrementar las pérdidas por unidad de longitud de las líneas del sistema de refrigeración como se mencionó anteriormente.

8.3.5 Calor disipado en cada unidad de generación

Para hallar el calor disipado de cada generador se usó el modelo de cálculo de transferencia de calor de Fourier.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

Donde:

Q: Flujo masico (kg/s)

C_p: Calor especifico

T₂: Temperatura de salida generador

T₁: Temperatura de entrada generador

El C_p se halló de la tabla A.6 del Incropera para el promedio de la temperatura.

A continuación, se muestra los resultados de calor disipado por cada unidad:

Tabla 2: Calor disipado por cada unidad

	ΔT °C	Calor disipado KJ/s
Unidad 1	1,8	127,541405
Unidad 2	2,1	150,4079908
Unidad 3	2,3	159,7908517
Unidad 4	2,62	174,0503844
celdas de ref	2,23	-612,58839

De la tabla 2 se puede observar que se conserva el balance de energía, ya que el calor disipado por las celdas es similar el calor extraído por el sistema de refrigeración.

Se observó que a pesar de que el caudal que circula por la unidad uno (1) es un poco mayor al caudal que circula por las demás unidades, el calor disipado es menor; la configuración de cada unidad de generación es la misma, esto significa que la unidad uno (1) presenta problemas de transferencia de calor en los intercambiadores.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se realizó la búsqueda y recolección de la información técnica del sistema de refrigeración de la central hidroeléctrica Tequendama, ésta información permitió establecer una línea base de funcionamiento de acuerdo al diseño del sistema de refrigeración para hacer la correcta evaluación del estudio de operación del sistema para el desarrollo de este estudio; entre la información obtenida se tiene histórico de temperaturas, manuales de operación, diagrama hidráulico, diagrama isométrico, ficha técnica de la bomba, ficha técnica de las celdas de refrigeración.
- Se verificó toda la información obtenida y se observó cambios en el sistema de refrigeración específicamente en las bombas, ya que anteriormente el sistema de refrigeración estaba constituido con (dos) 2 bombas de una cabeza máxima de 31.64 m a 1700 RPM y un caudal de 355m³/h, actualmente la bomba está diseñada para funcionar a una cabeza de 50 m a 1800 RPM y un caudal de 360 m³/h. Se validó que la información recolectada estuviese alineada a la actualidad.
- Se realizó las mediciones de caudal, temperatura, espesores. De igual modo se calculó la temperatura aproximada del fluido; finalmente se concluyó que la condición operativa de los equipos de la central hidroeléctrica específicamente la bomba de refrigeración no se encuentra operando en las condiciones de diseño, ya que como se mencionó anteriormente el caudal que entrega la bomba (239.89 m³/h) está muy por debajo del caudal de diseño (360 m³/h).

Adicional al problema identificado de operación de la bomba, se concluyó que las celdas de refrigeración no se encuentran operando eficientemente como se mencionó anteriormente, ya que aun estando sobredimensionadas el delta de temperatura es muy bajo, en base a esto se recomienda realizar

una revisión general de las condiciones operativas del moto-ventilador de las celdas.

- En base a los cálculos realizados se concluye que el problema de alta temperaturas en los cojinetes se debe a un conjunto de variables que afectan la operación y/o funcionamiento de los equipos de los cuales se constituye el sistema de refrigeración.

La variable principal es el poco caudal que está circulando por todo el sistema de refrigeración, evidenciando un problema de perdidas en la tubería debido a la incrustación de minerales.

El diseño del sistema de refrigeración se puede mejorar considerablemente si se independiza el sistema, es decir instalar más bombas de refrigeración, por lo menos una (1) bomba para llevar el agua a dos (2) unidades de generación.

El conjunto de las torres de refrigeración no está operando de manera eficiente ya que el delta de temperatura es muy bajo para el caudal que está circulando actualmente.

BIBLIOGRAFÍA

- Cengel, Y. A.; Boles, M.A.: Termodinamica. Mc Graw-Hill, 1996.
- F. P. Incropera y D. P. De Witt: Fundamentos de Transferencia de Calor, 4a Ed, Pearson Educacion, Mexico, 2000,
- F. Kreith y M. S. Bohn,: Principios de Transferencia de Calor, 6a edicion, Thomson, Madrid, 2002.
- VENNARD , J.K. ; STREET , R.L. "Elementos de Mecánica de fluidos" Ed. Continental (1979).
- WHITE , F. "Mecánica de fluidos" Ed. McGraw Hill (2008).
- GILES. R.V. "Mecánica de fluidos e hidráulica" Ed. McGraw Hill (1994)
- Holman, J. P.: Transferencia de Calor, 8a edicion, Mc Graw-Hill, Madrid, 1998
- Portal de documentación. ENEL- EMGESA
- HERRERA, Humberto. Guía de mantenimiento, Facultad de ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

ANEXOS

- Anexo A. Históricos de temperaturas de los cojinetes de la central hidroeléctrica Tequendama.
- Anexo B. Manuales de operación, diagrama hidráulico, diagrama isométrico, ficha técnica de la bomba, ficha técnica de las celdas de refrigeración